

МОДЕРНИЗАЦИЯ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА С ПЛАВКИМ ЯДРОМ

Аннотация

Цель этой работы произвести расчеты, необходимые для модернизации регенеративного секционного теплообменника с плавким ядром. В этой статье произведены расчеты каждой из 10 секций регенеративного теплообменника плавкими ядрами так, чтобы они обеспечили бы заданные изменения температуры дыма и воздуха в каждой секции, с учетом того, что плавкое ядро секций должно оставаться в режиме перехода из жидкого в твердое состояние и обратно, при котором выделяется или поглощается скрытая теплота плавления, что обеспечивает постоянство температуры плавкого ядра, а, следовательно, и температуры нагрева воздуха.

Ключевые слова: *регенеративный теплообменник, теплообменник, регенератор, тепло, плавкое ядро.*

Abstract

The purpose of this work to make calculations necessary for modernization of the regenerative section heat exchanger with a fusible kernel. In this article calculations of each of 10 sections of the regenerative heat exchanger are made by fusible kernels so that they would provide the set temperature changes of smoke and air in each section taking into account that the fusible kernel of sections has to remain in the transition mode from liquid in a firm state at which the hidden warmth of melting is allocated or absorbed that provides constancy of temperature of a fusible kernel, and, therefore, and air heating temperatures.

Key words: *regenerative heat exchanger, heat exchanger, regenerator, heat, fusible kernel.*

Сегодня на нагревательных печах достаточно успешно применяются регенеративные горелки, однако эти горелки имеют и ряд недостатков, поэтому существует необходимость стабилизации температуры нагрева воздуха, увеличении времени перекидки, а также снижении габаритов регенеративного теплообменника.

Идея использования скрытой теплоты плавления для стабилизации температуры нагрева воздуха и увеличения времени перекидки была предложена Я.М. Гордоном и Ю.Г. Ярошенко, которые применили регенеративный теплообменник, содержащий секцию с насадкой, имеющей плавкое ядро. В этой работе, за основу взят теплообменник, содержащий набор соединенных между собой секций с насадками из параллельных пластин, сохраняющих в процессе теплопередачи свое агрегатное состояние. Эти секции, соединенные между собой, предвключены по нагреваемой и греющей средам к секции с так называемым плавким ядром. Это секция, насадка которой выполнена из частиц с внутренним ядром, изменяющим в процессе теплопередачи свое агрегатное состояние.

Предлагаемый нами теплообменник отличается тем, что состоит из последовательно установленных секций, каждая из которых имеет насадку с плавким ядром, выполненным из материалов с различной температурой плавления, минимальное значение которой составляет не ниже 150°C , при этом плавкое ядро насадки каждой последующей секции выполнено из материала с температурой плавления примерно на 100°C выше температуры плавления материала плавкого ядра насадки предыдущей секции.

Данная конструкция позволяет использовать в насадке скрытую теплоту плавления плавкого ядра, которая значительно превосходит теплоемкость материала обычной керамической насадки, при этом температура плавящегося или кристаллизующегося ядра остается постоянной, а размеры насадки могут быть существенно уменьшены, что дает возможность встроить теплообменник в горелку печи. Кроме того, в предлагаемой конструкции теплообменника с плавким ядром существенно увеличивается время перекидки, притом, что температура подогрева воздуха остается постоянной.

Масса плавкого ядра может быть определена из теплового баланса секции. Количество теплоты, требуемое на расплавление ядра секции должно быть значительно больше количества теплоты, требуемое на нагрев воздуха или охлаждения продуктов сгорания на температуру равную разности температур плавления металлов в соседних секциях. Это обеспечит увеличение времени перекидок, при котором плавкое ядро будет оставаться в состоянии перехода из жидкого в твердое, либо из твердого в жидкое состояние.

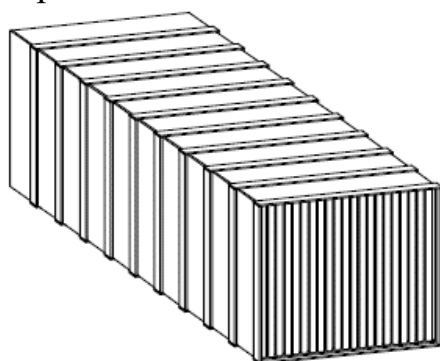


Рис. 1. Блок регенератора из 10 секций

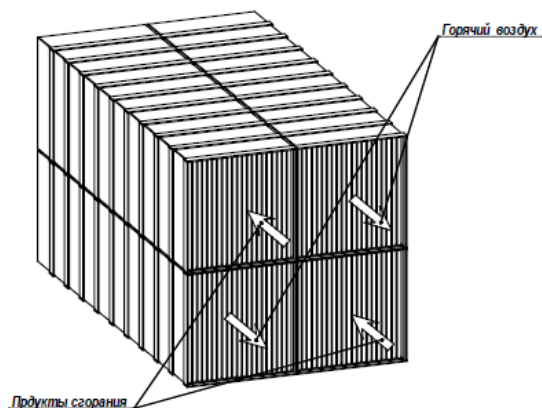


Рис. 2. Регенератор с плавким ядром из четырех блоков (по десять секций в каждом блоке)

Рассчитаем такой теплообменник для регенеративной горелки мощностью 200 кВт с расходом природного газа 20 м³/ч. Начнем с определения размеров каждой секции регенеративного теплообменника, содержащего 10 секций с разными плавкими ядрами, которые обеспечили бы заданные изменения температуры дыма и воздуха в каждой секции, при этом плавкое ядро секций должно оставаться в режиме перехода из жидкого в твердое состояние, при котором выделяется или поглощается скрытая теплота плавления, что обеспечивает постоянство температуры плавкого ядра, а, следовательно, и температуры нагрева воздуха. Притом, что в каждой секции воздух нагревается примерно на 100 °С, а количество секций с разными плавкими ядрами предполагается 10, воздух должен нагреться примерно до 1000 °С.

Секция представляет собой спираль из нержавеющей стали с наружным диаметром $d_n = 5$ мм и внутренним – $d_v = 4$ мм. Расстояние между наружными поверхностями рядом стоящих трубок – $c = 1,5$ мм, Ширина и высота секции одинаковы $z = 150$ мм. Это предварительные размеры секции, которые в результате расчетов могут быть скорректированы. Длина секции определяется свойствами плавкого ядра, точнее его теплотой плавления. Трубки заполняются изнутри плавким ядром и завариваются по торцам. Всего регенеративных блоков в данной горелке предполагается четыре, два из которых работают на подогрев воздуха и кристаллизацию ядра, а два – на охлаждение продуктов сгорания и нагрев, и расплавление ядра.

Изнутри трубки секции заполнены металлом с одинаковой температурой плавления, при этом, трубки соседних секции, заполняются металлом с температурой плавления, отличающейся примерно на 100 °С.

При такой компоновке регенеративного блока, температура дыма, проходящего через регенератор, должна снижаться в каждой секции примерно на 100 °С, а температура воздуха подниматься на 100 °С.

Каждая из секций регенеративного теплообменника с плавким ядром состоит из емкостей, заполненных плавким металлом. Емкости имеют развитую наружную поверхность для обеспечения теплового потока, достаточного для передачи плавкому ядру и отбора у продуктов сгорания достаточного количества теплоты для охлаждения последних примерно на 100 °С за время прохождения через секцию продуктов сгорания, в количестве соответствующем объему продуктов сгорания, образующихся при сжигании газа в одной горелке, соответствующем ее тепловой мощности.

По уравнению VII.19 (Расчеты нагревательных печей. Гольдфарб Э.М., Кравцов А.Ф., Радченко и др. под ред. Н.Ю. Тайца Государственное издательство технической литературы УССР. Киев. 1958, 420 с.)

$$\alpha_B = (4,3 + 0,0038 \bar{t}_B) c \frac{w_B^{0,6}}{d_n^{0,4}} \cdot 1,163$$

где w_B – средняя скорость воздуха в свободном сечении секции (примем ее равной 6 м/с (исходя из условий минимизации гидравлического сопротивления));
 \bar{t}_B – средняя температура воздуха в секции, °С.

Рассчитан коэффициент теплоотдачи для спиралевидной трубы от теплообменной поверхности секции к воздуху, Вт/(м²*К), который равен 146,39 Вт/м².

Поскольку мы приняли спиралевидное расположение трубок, то одна спираль будет расположена в одном ряду. Общее количество рядов примем количество рядов N=8 рядов, соответственно количество спиралей тоже равно 8.

Тепловая мощность, которую получит воздух, проходя через секцию, определим по формуле:

$$q = V_b \cdot C_b \cdot \Delta t_b = 0,0281 \cdot 1290 \cdot 100 = 3625 \text{ Вт.}$$

В 8 трубках, внутренним диаметром 5 мм и длиной 150 мм, можно разместить плавкое ядро массой $M = 8 \cdot 0,005^2 \cdot 0,785 \cdot 0,15 \cdot 8500 = 0,2$ кг. На плавление такого количества плавкого ядра с теплотой плавления 45,73 кДж/кг и плотностью 8500 кг/м³, затрачивается количество теплоты $Q = 45,73 \cdot 0,2 = 9,146$ кДж.

Время плавления ядра, т.е. время перекидки составит: $\tau = Q/q = 9146/3625 = 2,5$ с. Длина секции из восьми рядов трубок диаметром 5 мм расположенными спиралевидно и расстоянием между трубками 1,5 мм, составит $L_1 = 50,5$ мм.

Аналогичным образом можно рассчитать время перекидки и длину второй и последующих секций с плавким ядром. Вторая секция с плавким ядром из олова с теплотой плавления 59 кДж/кг, температурой плавления 231,9 и плотностью 6834 кг/м³.

Поперечные размеры секции остаются неизменными – 150x150 мм. Количество труб и их расположение не изменяются.

Принимаем температуру воздуха на входе во вторую секцию – 120 °С. Температуру воздуха на выходе из секции 220 °С. Средняя температура воздуха во второй секции составит – $\bar{t}_b = (120 + 220)/2 = 170$ °С. Температура стенки секции примем равной температуре плавления олова $t = 231,9$.

Поскольку не изменились ни скорости воздуха ни размеры поперечного сечения, то коэффициент теплоотдачи останется прежним – 103,7 Вт/(м²*К).

Площадь поверхности теплообмена секции определим по уравнению:

$$f = \frac{V_b \cdot C_b \cdot \Delta t_b}{\alpha(\bar{t}_n - \bar{t}_b)}$$

$$f = \frac{1,02 \cdot 0,0281 \cdot 1300 \cdot 100}{146,39(231,9 - 170)} = 0,41 \text{ м}^2.$$

Общее количество трубок $n = 0,41/0,00283 = 145$ шт. Количество пар рядов составит $145/37 = 3,9$ примем 4 пары, т.е. 8 рядов. В этом случае длина секции составит – $L_2 = 50,5$ мм.

Масса плавкого ядра $M = 144 \cdot 0,005^2 \cdot 0,785 \cdot 0,15 \cdot 6834 = 2,89$ кг.

Количество теплоты, содержащееся в расплавленном ядре, составляет $Q = 59 \cdot 2,89 = 170,919$ кДж или 170919 Дж.

Тепловая мощность, которую получит воздух в секции, составит:

$$q = V_b \cdot C_b \cdot \Delta t_b = 0,0281 \cdot 1300 \cdot 100 = 3653 \text{ Вт.}$$

Время перекидки $\tau = Q/q = 170919/3653 = 46,7$ с.

Время перекидки получилось больше. Это значит, что не все олово перейдет в кристаллическое состояние, т.е. часть его будет оставаться жидким.

Третья по ходу воздуха секция имеет плавкое ядро из свинца с температурой плавления 327,5 °С, удельной теплотой плавления 24,3 кДж/кг и плотностью 10510 кг/м³.

Принимаем температуру воздуха на входе во вторую секцию – 220 °С. Температуру воздуха на выходе из секции 320 °С. Средняя температура воздуха во второй секции составит – $\bar{t}_B = (220+320)/2 = 270$ °С. Температура стенки секции примем равной температуре плавления свинца $t = 327,5$.

Поскольку не изменились ни скорости воздуха ни размеры поперечного сечения, то коэффициент теплоотдачи останется прежним – 103,7 Вт/(м²*К).

Площадь поверхности теплообмена секции определим по уравнению:

$$f = \frac{V_B \cdot C_B \cdot \Delta t_B}{\alpha (\bar{t}_n - \bar{t}_B)}$$

$$f = \frac{1,02 \cdot 0,0281 \cdot 1308 \cdot 100}{146,39(327,5 - 270)} = 0,445 \text{ м}^2.$$

Общее количество трубок $n = 0,445/0,00283 = 158$ шт. количество пар рядов составит 158/37=4.27 примем 4 пары, т.е. 8 рядов. В этом случае длина секции составит – $L_3 = 50,5$ мм.

Масса плавкого ядра $M = 158 \cdot 0,005^2 \cdot 0,785 \cdot 0,15 \cdot 10510 = 4,89$ кг.

Количество теплоты, содержащееся в расплавленном ядре, составляет $Q = 24,3 \cdot 4,89 = 118,786$ кДж или 118786 Дж.

Тепловая мощность, которую получит воздух в секции, составит:

$$q = V_B \cdot C_B \cdot \Delta t_B = 0,0281 \cdot 1308 \cdot 100 = 3675 \text{ Вт.}$$

Время перекидки $\tau = Q/q = 118786/3675 = 32,3$ с.

Плавким ядром в четвертой секции по ходу воздуха является цинк с температурой плавления 419,5, удельной теплотой плавления – 112,2.

Принимаем температуру воздуха на входе в четвертую секцию – 320 °С. Температуру воздуха на выходе из секции 420 °С. Средняя температура воздуха во второй секции составит – $\bar{t}_B = (320+420)/2 = 370$ °С. Температура стенки секции примем равной температуре плавления цинка $t = 419,5$.

Поскольку не изменились ни скорости воздуха ни размеры поперечного сечения, то коэффициент теплоотдачи останется прежним – 103,7 Вт/(м²*К).

Площадь поверхности теплообмена секции определим по уравнению:

$$f = \frac{1,02 \cdot 0,0281 \cdot 1310 \cdot 100}{146,39(419,5 - 370)} = 0,518 \text{ м}^2.$$

Общее количество трубок $n = 0,518/0,00283 = 184$ шт. количество пар рядов составит 184/37=4,9 примем 5 пар, т.е. 10 рядов. В этом случае длина секции составит – 63,5 мм.

Масса плавкого ядра $M = 184 \cdot 0,005^2 \cdot 0,785 \cdot 0,15 \cdot 7135 = 3,86$ кг.

Количество теплоты, содержащееся в расплавленном ядре, составляет $Q = 112,2 \cdot 3,86 = 433$ кДж или 433000 Дж.

Тепловая мощность которую получит воздух в секции составит:

$$q = V_B \cdot C_B \cdot \Delta t_B = 0,0281 \cdot 1310 \cdot 100 = 3681 \text{ Вт.}$$

Время перекидки $\tau = Q/q = 433000/3681 = 117,63$ с.

Плавким ядром в пятой секции по ходу воздуха является силумин АК-12 (литейный сплав алюминия с кремнием) с температурой плавления 550 °С, удельной теплотой плавления – 365,36 кДж/кг.

Принимаем температуру воздуха на входе в четвертую секцию – 420 °С. Температуру воздуха на выходе из секции 520 °С. Средняя температура воздуха во второй секции составит – $\bar{t}_B = (420 + 520) / 2 = 470$ °С. Температура стенки секции примем равной температуре плавления силумина $t = 550$ °С.

Поскольку не изменились ни скорости воздуха ни размеры поперечного сечения, то коэффициент теплоотдачи останется прежним – 103,7 Вт/(м²·К).

Площадь поверхности теплообмена секции определим по уравнению:

$$f = \frac{1,02 \cdot 0,0281 \cdot 1320 \cdot 100}{146,39(550 - 470)} = 0,323 \text{ м}^2.$$

Общее количество трубок $n = 0,323 / 0,00283 = 115$ шт. количество пар рядов составит 115/37=3.1 примем 3 пар, т.е. 6 рядов. В этом случае длина секции составит – $L_5 = 37,5$ мм.

Масса плавкого ядра $M = 115 \cdot 0,005^2 \cdot 0,785 \cdot 0,15 \cdot 7135 = 2,4$ кг.

Количество теплоты, содержащееся в расплавленном ядре, составляет $Q = 364,36 \cdot 2,4 = 880,082$ кДж или 880082 Дж.

Тепловая мощность которую получит воздух в секции составит:

$$q = V_B \cdot C_B \cdot \Delta t_B = 0,0281 \cdot 1320 \cdot 100 = 3709,2 \text{ Вт.}$$

Время перекидки $\tau = Q/q = 880082 / 3709,2 = 237,27$ с.

Плавким ядром в шестой секции по ходу воздуха является алюминий с температурой плавления 660 °С, удельной теплотой плавления – 393,2 кДж/кг.

Принимаем температуру воздуха на входе в четвертую секцию – 520 °С. Температуру воздуха на выходе из секции 620 °С. Средняя температура воздуха в шестой секции составит – $\bar{t}_B = (520 + 620) / 2 = 570$ °С. Температура стенки секции примем равной температуре плавления алюминия $t = 660$.

Поскольку не изменились ни скорости воздуха ни размеры поперечного сечения, то коэффициент теплоотдачи останется прежним – 103,7 Вт/(м²·К).

Площадь поверхности теплообмена секции определим по уравнению:

$$f = \frac{1,02 \cdot 0,0281 \cdot 1340 \cdot 100}{146,39(660 - 570)} = 0,29 \text{ м}^2.$$

Общее количество трубок $n = 0,29 / 0,00283 = 103$ шт. количество пар рядов составит 103/37=2,7 примем 3 пары, т.е. 6 рядов. В этом случае длина секции составит – $L_6 = 37,5$ мм.

Масса плавкого ядра $M = 103 \cdot 0,005^2 \cdot 0,785 \cdot 0,15 \cdot 2380 = 0,721$ кг.

Количество теплоты, содержащееся в расплавленном ядре, составляет $Q = 393,2 \cdot 0,721 = 283,745$ кДж или 283745 Дж.

Тепловая мощность, которую получит воздух в секции, составит:

$$q = V_B \cdot C_B \cdot \Delta t_B = 0,0281 \cdot 1340 \cdot 100 = 3765 \text{ Вт.}$$

Время перекидки $\tau = Q/q = 283745 / 3765 = 75,36$ с.

Плавким ядром в седьмой секции по ходу воздуха является алюминиевый антифрикционный сплав АСМ с температурой плавления 750 °С, удельной теплотой плавления – 382,84.

Принимаем температуру воздуха на входе в четвертую секцию – 620 °С. Температуру воздуха на выходе из секции 720 °С. Средняя температура воздуха во второй секции составит – $\bar{t}_B = (620 + 720) / 2 = 670$ °С. Температура стенки секции примем равной температуре плавления АСМ $t = 750$ °С.

Поскольку не изменились ни скорости воздуха ни размеры поперечного сечения, то коэффициент теплоотдачи останется прежним – 103,7 Вт/(м²·К).

Площадь поверхности теплообмена секции определим по уравнению:

$$f = \frac{1,02 \cdot 0,0281 \cdot 1354 \cdot 100}{149,36(750 - 670)} = 0,33 \text{ м}^2.$$

Общее количество трубок $n = 0,33 / 0,00283 = 117$ шт. количество пар рядов составит $117 / 37 = 3,1$ примем 3 пар, т.е. 6 рядов. В этом случае длина секции составит – $L_7 = 37,5$ мм.

Масса плавкого ядра $M = 117 \cdot 0,005^2 \cdot 0,785 \cdot 0,15 \cdot 2830 = 0,974$ кг.

Количество теплоты, содержащееся в расплавленном ядре, составляет $Q = 384,82 \cdot 0,974 = 374,814$ кДж или 374814 Дж.

Тепловая мощность, которую получит воздух в секции, составит:

$$q = V_B \cdot C_B \cdot \Delta t_B = 0,0281 \cdot 1354 \cdot 100 = 3804 \text{ Вт.}$$

Время перекидки $\tau = Q / q = 374814 / 3804 = 98,5$ с.

Плавким ядром в восьмой секции по ходу воздуха является МЛ11 (магний литейный сплав) с температурой плавления 843 °С, удельной теплотой плавления – 350,22 кДж/кг.

Принимаем температуру воздуха на входе в четвертую секцию – 720 °С. Температуру воздуха на выходе из секции 920 °С. Средняя температура воздуха в восьмой секции составит – $\bar{t}_B = (720 + 920) / 2 = 820$ °С. Температура стенки секции примем равной температуре плавления МЛ11 $t = 843$ °С.

Поскольку не изменились ни скорости воздуха ни размеры поперечного сечения, то коэффициент теплоотдачи останется прежним – 103,7 Вт/(м²·К).

Площадь поверхности теплообмена секции определим по уравнению:

$$f = \frac{1,02 \cdot 0,0281 \cdot 1382 \cdot 100}{146,39(843 - 820)} = 0,409 \text{ м}^2.$$

Общее количество трубок $n = 0,409 / 0,00283 = 145$ шт. количество пар рядов составит $145 / 37 = 3,9$ примем 4 пар, т.е. 8 рядов. В этом случае длина секции составит – $L_8 = 50,5$ мм.

Масса плавкого ядра $M = 145 \cdot 0,005^2 \cdot 0,785 \cdot 0,15 \cdot 1800 = 0,768$ кг.

Количество теплоты, содержащееся в расплавленном ядре, составляет $Q = 350,22 \cdot 0,768 = 268,96$ кДж или 268960 Дж.

Тепловая мощность, которую получит воздух в секции, составит:

$$q = V_B \cdot C_B \cdot \Delta t_B = 0,0281 \cdot 1382 \cdot 100 = 3883 \text{ Вт.}$$

Время перекидки $\tau = Q / q = 268960 / 3883 = 69,2$ с.

Плавким ядром в девятой секции по ходу воздуха является бронза БрБ2 с температурой плавления 955, удельной теплотой плавления – 209,44.

Принимаем температуру воздуха на входе в четвертую секцию – 820 °С. Температуру воздуха на выходе из секции 920 °С. Средняя температура воздуха во второй секции составит – $\bar{t}_B = (820 + 920) / 2 = 870$ °С. Температура стенки секции примем равной температуре плавления бронзы $t = 955$ °С.

Поскольку не изменились ни скорости воздуха ни размеры поперечного сечения, то коэффициент теплоотдачи останется прежним – 103,7 Вт/(м²*К).

Площадь поверхности теплообмена секции определим по уравнению:

$$f = \frac{1,02 \cdot 0,0281 \cdot 1384 \cdot 100}{146,39(955 - 870)} = 0,31 \text{ м}^2.$$

Общее количество трубок $n = 0,31 / 0,00283 = 110$ шт. количество пар рядов составит $110 / 37 = 2,97$ примем 3 пар, т.е. 6 рядов. В этом случае длина секции составит – $L_9 = 37,5$ мм.

Масса плавкого ядра $M = 110 \cdot 0,005^2 \cdot 0,785 \cdot 0,15 \cdot 8920 = 2,888$ кг.

Количество теплоты, содержащееся в расплавленном ядре, составляет $Q = 209,44 \cdot 2,888 = 604,948$ кДж или 604948 Дж.

Тепловая мощность, которую получит воздух в секции, составит:

$$q = V_B \cdot C_B \cdot \Delta t_B = 0,0281 \cdot 1384 \cdot 100 = 3889 \text{ Вт.}$$

Время перекидки $\tau = Q/q = 604948 / 3889 = 155,5$ с.

Плавким ядром в десятой секции по ходу воздуха является медь с температурой плавления 1083 °С, удельной теплотой плавления – 213 кДж/кг.

Принимаем температуру воздуха на входе в четвертую секцию – 920 °С. Температуру воздуха на выходе из секции 1020 °С. Средняя температура воздуха во второй секции составит – $\bar{t}_B = (920 + 1020) / 2 = 970$ °С. Температура стенки секции примем равной температуре плавления цинка $t = 1083$ °С.

Поскольку не изменились ни скорости воздуха ни размеры поперечного сечения, то коэффициент теплоотдачи останется прежним – 103,7 Вт/(м²*К).

Площадь поверхности теплообмена секции определим по уравнению:

$$f = \frac{1,02 \cdot 0,0281 \cdot 1395 \cdot 100}{146,39(1083 - 970)} = 0,23 \text{ м}^2.$$

Общее количество трубок $n = 0,23 / 0,00283 = 83$ шт. количество пар рядов составит $83 / 37 = 2,2$ примем 2 пары, т.е. 4 ряда. В этом случае длина секции составит – $L_{10} = 24,5$ мм.

Масса плавкого ядра $M = 83 \cdot 0,005^2 \cdot 0,785 \cdot 0,15 \cdot 8930 = 2,18$ кг.

Количество теплоты, содержащееся в расплавленном ядре, составляет $Q = 213 \cdot 2,18 = 464,34$ кДж или 464340 Дж.

Тепловая мощность, которую получит воздух в секции, составит:

$$q = V_B \cdot C_B \cdot \Delta t_B = 0,0281 \cdot 1395 \cdot 100 = 3920 \text{ Вт.}$$

Время перекидки $\tau = Q/q = 464340 / 3920 = 118,45$ с.

Общая длина регенеративного теплообменника, состоящего из десяти секций – 477 мм.

В дальнейшем будет рассчитан теплообмен между продуктами сгорания и поверхностями секций при движении в них газов, с учетом конвективной и лучистой составляющих теплообмена. Целью этого расчета является определения необходимой для плавления насадки поверхности нагрева в каждой секции и времени плавления ядра, а также, выяснения, на основе полученных результатов, возможности сообщить насадке требуемое количество теплоты в секциях с размерами, определенными предыдущим расчетом.